

マイクロ流体デバイス内の流動における 物性分布の影響の解析

Effect of property distribution on flow behavior in microfluidic system

東京理科大学

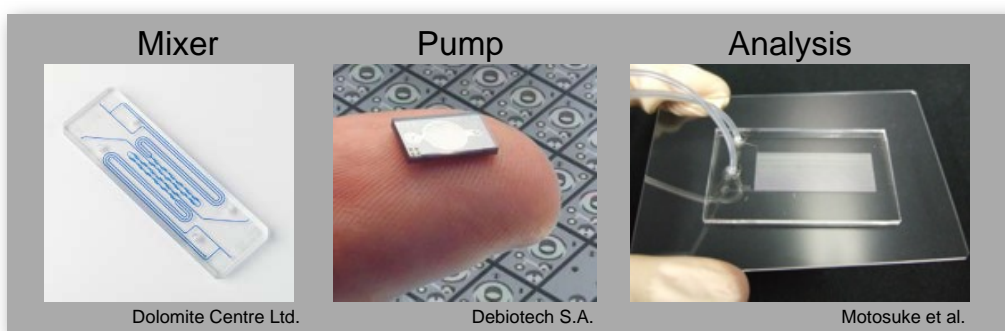
元祐 昌廣

mot@rs.tus.ac.jp

Role of properties in micro-world



- Lab-on-a-chip



- Transport phenomena in small domain

体積力 \ll 表面力 \rightarrow “Property dominant”

$$\text{Re} = \frac{UL}{\nu} \quad \text{粘性} \qquad \text{Pe}_H = \frac{UL}{a} \quad \text{熱伝導} \qquad \text{Pe}_M = \frac{UL}{D} \quad \text{分子拡散}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad \rightarrow \quad \nabla p = \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

Temperature-dependent property



- 局所温度変化の存在
 - 反応熱
 - ジュール熱
 - 光加熱

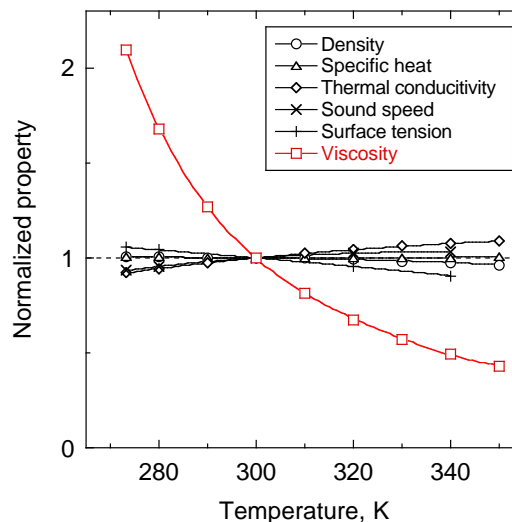
- 物性は温度に依存

Uniform change

$$U \propto \frac{1}{\mu} \rightarrow \text{粘性に反比例}$$



局所分布を有する場合は？



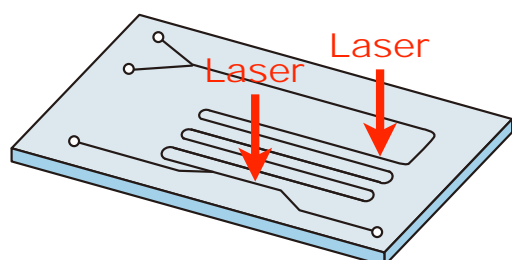
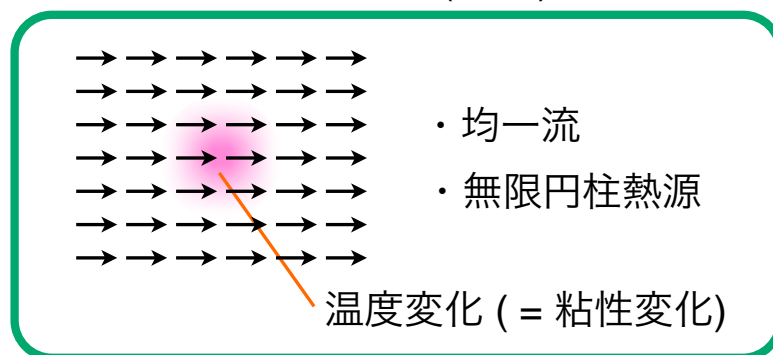
TARGET

局所温度分布によって誘起された
不均一物性場における流動構造の解明

How to induce local temp. change



Test model (ideal)



光エネルギー吸収

▼ — 光熱変換

局所流体温度の上昇

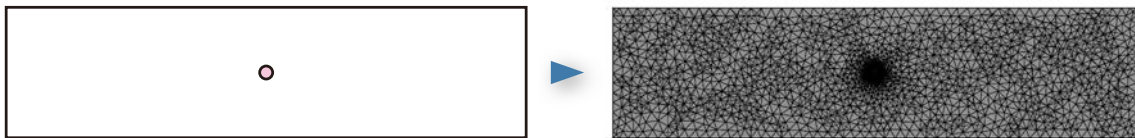


集光領域の粘性率低下

Numerical model



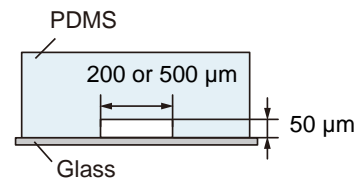
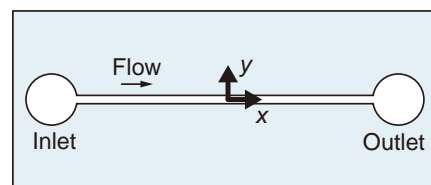
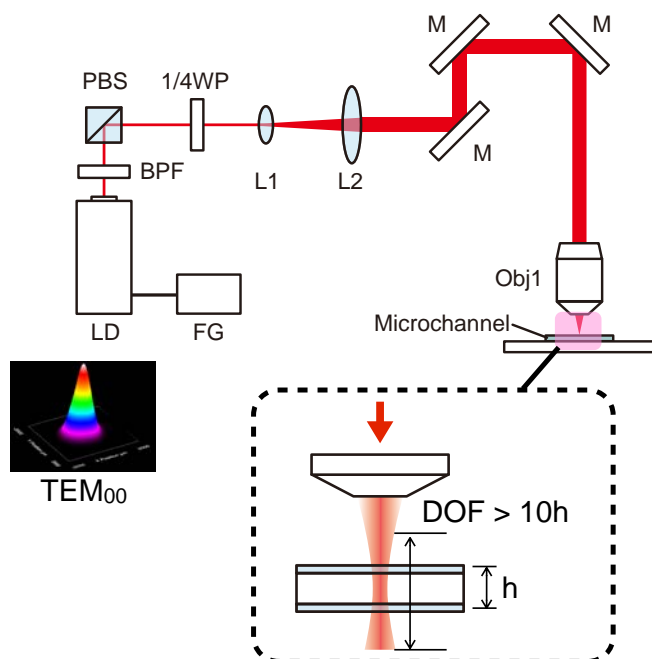
Physics	Geometry
Incompressible Navier-Stokes Continuity Energy balance - Cylindrical heat source (d 50 μ m) - No-slip wall	Length : 20 mm Width : 500 μ m Height : 50 μ m
Material Water...temp.dependent (individually controlled)	



Experimental system

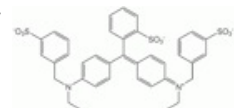


- Local heating by focused laser beam
- Inhomogeneous viscosity generation



● 作動流体

Sodium tetraborate buffer solution
& Light absorber



Velocity & Temperature meas.



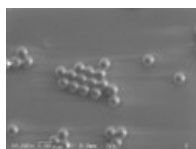
流速分布

Particle image velocimetry

Tracer particle :

Fluorescent polystyrene beads
(diameter 700 nm)

Ex : 468 nm
Em : 508 nm



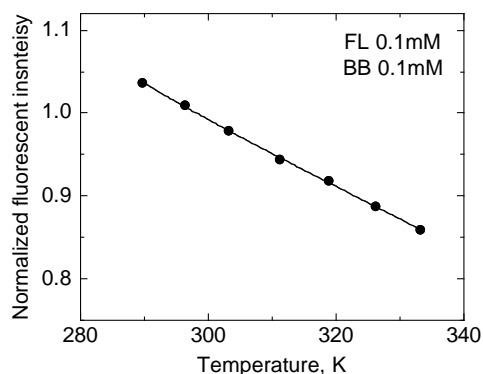
Spatial resolution : 10 μm
Temporal resolution : 500 μs
Averaging : 100

温度分布

Laser-induced fluorescence

Dye : Fluorescein (0.1mM)

Ex : 492 nm
Em : 521 nm



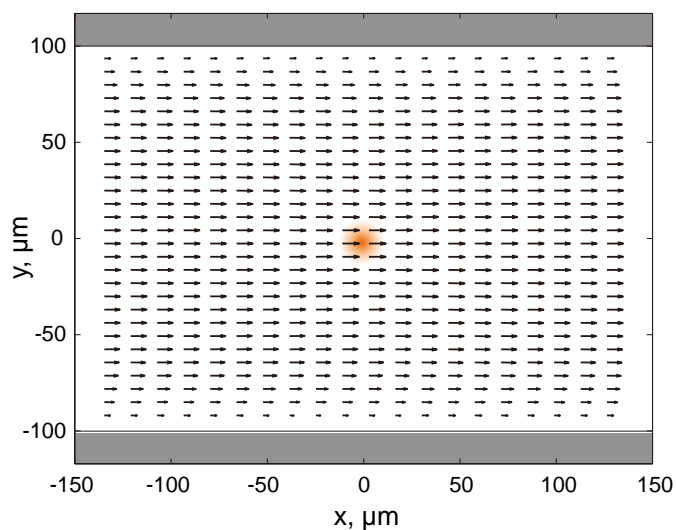
Spatial resolution : 530 nm
Temporal resolution : 500 μs

Temp. & Velo. under heating



- レーザ光を集光したときの温度・速度場

Channel : 200 x 50 μm



基準流速 : 1.8 mm/s

▶ $Re < 0.1$

中央部に集光

Laser power : 4 mW

Beam spot : 7 μm

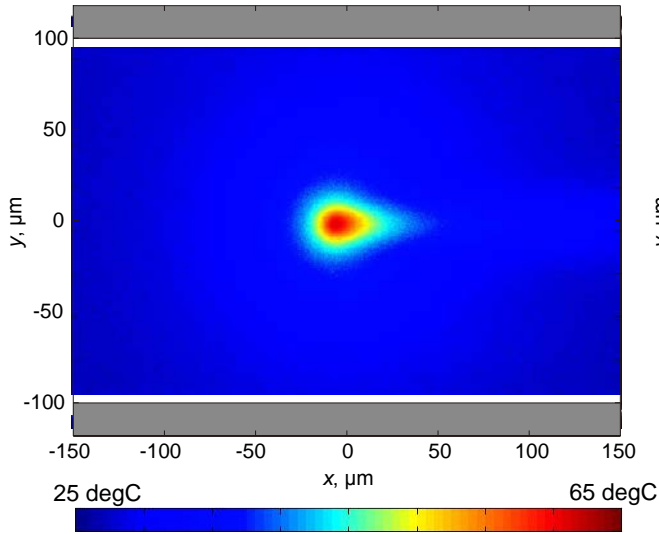
光照射後1s後に計測

▶ 時定数 \approx 10 ms

Temperature & Velocity fields

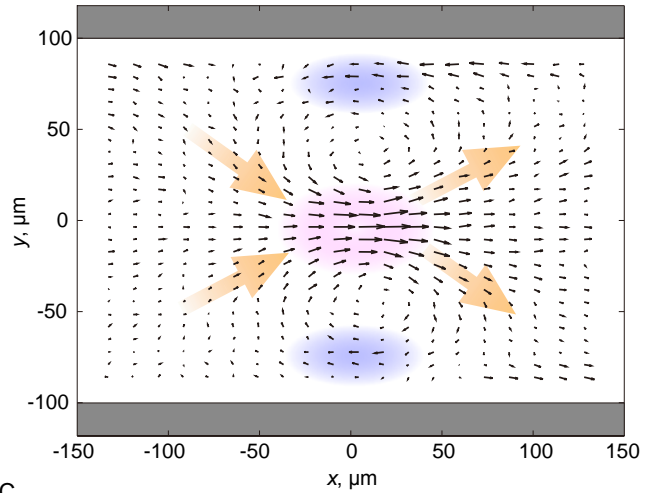


● 温度分布



最大温度上昇 $\approx 30\text{K}$
対流の寄与 (伝導支配)

● 相対速度分布 $dU = U_{\text{meas}} - U_b$

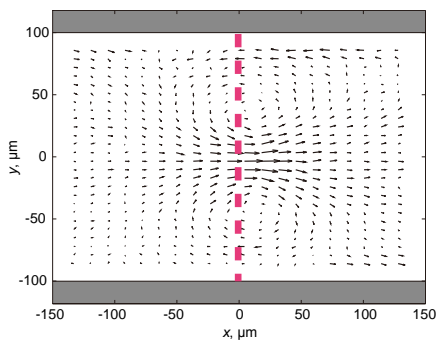


高温領域での増速
加熱部側方領域での減速
集光部への流入/からの流出

Detail of flow structure



● 速度変化と流量の関係

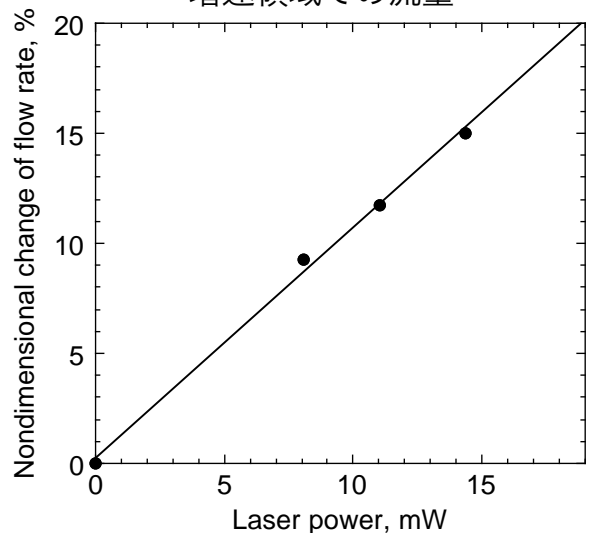


$$\int U(\text{減速部}) dy \approx \int U(\text{増速部}) dy$$



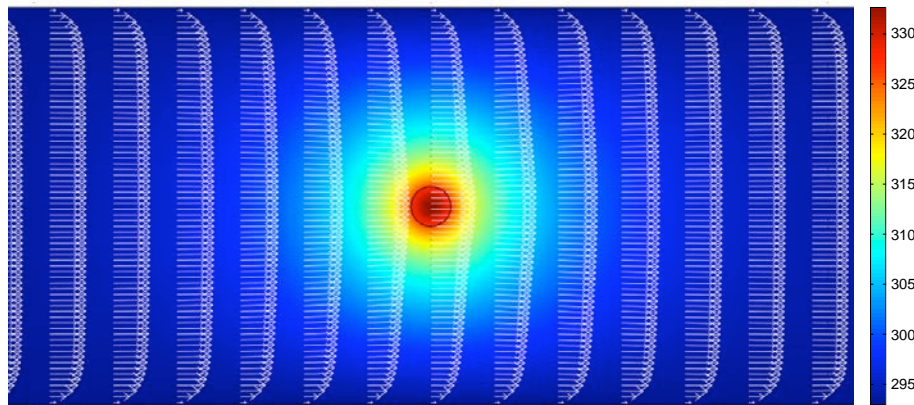
- ・ 流動構造の2次元性
- ・ 増速領域の流量変化で現象評価

増速領域での流量

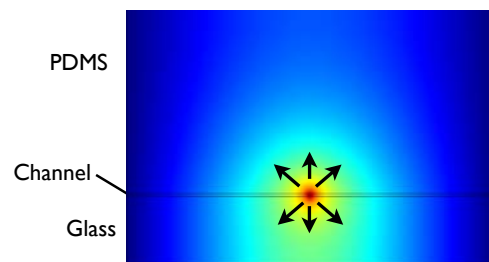


(* 温度増加と光強度は線形関係)

Calculation results



- - 加熱部分での速度増加
 - - 周囲流体の減速挙動
 - - 対称性, 2次元性
 - × - 定量性
- 基板や流路を經由する熱移動



Exp-aided simulation



- LIFで計測した温度分布をシミュレーションの入力に使用

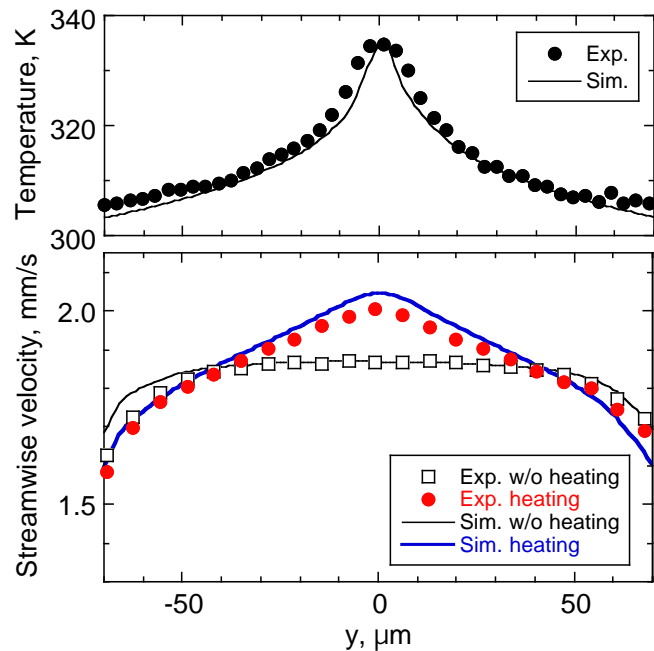
Temperature condition

Exp → Gaussian approx. → COMSOL

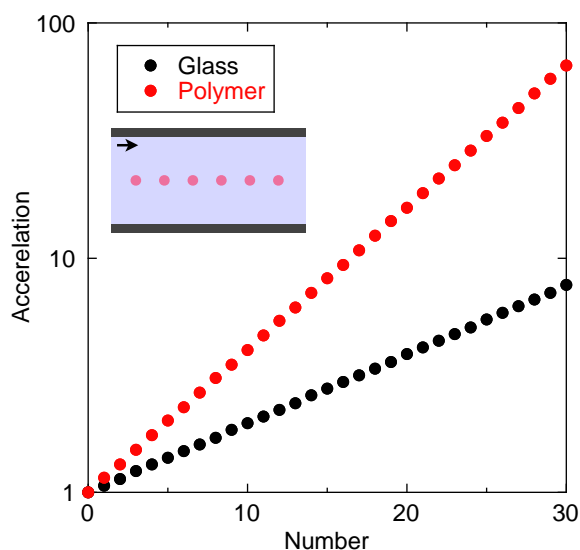
Exp ≙ Sim

各種物性分布の寄与

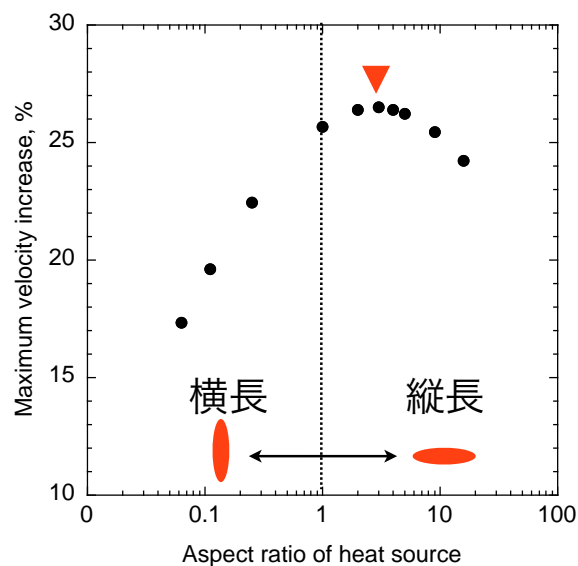
- **Viscosity**
- X **Specific heat**
- X **Density**
- X **Thermal conductivity**



基板材質の影響



集光形状の影響



Summary

- マイクロ流体デバイス内での物性分布が流動構造に及ぼす影響を実験・数値解析によって明らかにした。
- 物性の温度依存性は粘性分布が最も支配的となる。
- 微小デバイスでの熱流体現象を考える際、基板や流路への熱移動を考慮しないと結果を見誤る可能性がある。